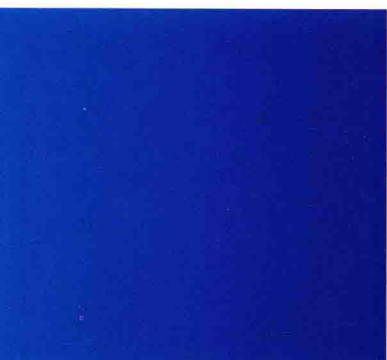


资源性缺水地区 水环境承载力研究及应用



◀ 周孝德/吴 巍 著 ▶



科学出版社

资源性缺水地区水环境 承载力研究及应用

周孝德 吴 巍 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本研究针对中国北方资源性缺水地区普遍存在的水资源短缺、水环境恶化及生态脆弱等问题,面向生态文明制度建设这一国家重大需求,历经十余载,以水资源、水环境科学技术领域内“资源环境承载能力评估预测”这一关键科学问题为突破点,综合考虑资源性缺水地区水资源数量与质量之间的关系,兼顾理论研究与实际应用,构建了基于水动力学的水环境容量预测及生态需水量计算两方面内容的区域水环境承载力量化模式,形成了一套适用于中国北方资源性缺水地区的水环境承载能力评估预测研究体系,为资源性缺水地区生态保护红线的划定、区域资源环境承载能力监测预警机制的建立提供了理论依据与技术支持。

本书可作为高等院校水科学与环境科学等专业的研究生以及从事相关领域研究者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

资源性缺水地区水环境承载力研究及应用/周孝德,吴巍著. —北京:科学出版社, 2015. 11

ISBN 978-7-03-046139-1

I. ①资… II. ①周…②吴… III. ①干旱区-水资源-环境承载力-研究-中国 IV. ①TV213.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 256003 号

责任编辑:张 欣/责任校对:张小霞

责任印制:肖 兴/封面设计:北京图阅盛世文化传媒有限公司

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 11 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015 年 11 月第一次印刷 印张:9 1/4

字数:205 000

定价:69.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着人类社会的发展,因社会经济规模过大、产业结构不合理、生产布局不适当和环境保护措施不得力等引起的水环境问题日益突出,成为区域可持续发展的制约因素。在中国西北、华北等资源性缺水地区,水资源从空间尺度来看分布不均、地区差异大,从时间尺度来看年际变化大、年内分配不均、丰枯悬殊,加之此类地区普遍脆弱的生态环境,人均实际需(耗)水量远超人均可利用水量,水资源开发利用与生态、环境的矛盾尤显突出。因此,如何维持水环境的可持续利用,成为资源性缺水地区亟待研究解决的一个重要问题。

目前,在解决区域水环境问题方面普遍的认识是首先要保证水环境与社会经济的协调发展,而要实现这一点,其前提在于确定水环境系统所能持续支撑的人口总量和经济规模,即水环境承载力。作为区域可持续发展的研究热点之一,水环境承载力是在人们对社会可持续发展与水环境相互关系有了较深刻认识的基础上被提出来的,它体现了在维持一定生产、生活水平的前提下,水环境所能永远承载的人类活动的强烈程度。这一概念自20世纪90年代中期被作为可持续发展研究和水资源安全战略研究中的基础课题提出后,已迅速成为当前水环境科学研究中的焦点,国内外学者从不同角度论述了水环境承载力的基础理论和研究方法,同时亦被广泛应用于环境管理、环境规划和区域发展等领域,在实际问题的解决中有了诸多的应用实例,为区域可持续发展的规划提供了重要技术支撑。

鉴于此,本研究立足于中国西北、华北等资源性缺水地区,根据气候的干湿程度,通过区域降水量与蒸发量的对比状况分析,将研究区域划分为干旱区、半干旱区及半湿润区三类,分别基于其各自不同的水环境特点,就河流、湖泊以及行政区等不同类型的区域水环境承载力展开研究。研究在深入探讨区域水环境承载力理论体系的基础之上,结合可靠、适宜的量化方法,构建区域水环境承载力评价模型,通过对干旱区(新疆叶尔羌河流域、博斯腾湖)、半干旱区(陕西榆林市、山西桑干河流域)以及半湿润区(陕西渭河流域、山西汾河流域)实际区域的水环境承载力评价研究,建立并完善了科学、完整的区域水环境承载力评价思路,为资源性缺水地区的流域管理决策提供了切实可行的实施方案,对于协调水资源利用与经济活动之间的关系,实现流域生态环境与社会经济的可持续发展,具有重要而深远的意义。

本书主要内容是作者所属研究团队及课题组历经十余载的研究成果,课题组成员及历届研究生均做出了大量贡献,是集体智慧的结晶。在本书编写过程中,研究生刘睿、焦露慧、吴皎、李景远、赵猛、赵婷、任雷、周小飞、沈丽娜等不仅参与了部分研究工作,亦承担了大量资料收集、整编以及插图绘制、书稿校对工作,在此表示谢意。同时,西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地在制度与组织层面给予了诸多支持与保障,在此一并表示感谢。

本书得到 973 计划前期研究专项项目 (2012CB723200)、国家自然科学基金面上项目 (51179151)、陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2014JQ7285) 以及高等学校博士学科点专项科研基金 (20136118120022) 的资助, 在此致以深切谢意。

本书撰写过程中, 作者始终秉承理论与实际应用相结合的思路, 但鉴于承载力研究所涉尺度较宽, 且实际应用案例区域较广, 属多学科交叉研究领域, 加之作者研究水平有限, 书中难免出现疏漏和不足之处, 恳请得到广大读者的批评与指正。

作 者

2015 年 8 月

目 录

前言

上篇 理论基础

第 1 章 绪论	3
1.1 研究背景及意义	3
1.2 国内外研究进展	4
1.2.1 概念与内涵	4
1.2.2 研究方法	5
1.3 研究内容及技术路线	8
1.3.1 研究内容	8
1.3.2 技术路线	9
第 2 章 水环境承载力概述	11
2.1 水环境承载力的定义	11
2.1.1 基于阈值的水环境承载力优化定义	11
2.1.2 优化定义的内涵	12
2.2 主要特征及影响因素	12
2.2.1 主要特征	12
2.2.2 影响因素	13
2.3 指标体系与量化方法	14
2.3.1 指标体系的构建	15
2.3.2 指标体系权重的确定	16
2.3.3 区域水环境承载力量化方法	18
第 3 章 基于水动力学数学模型的水环境容量研究	20
3.1 河流一维水质及水环境容量模型	20
3.1.1 一维水流-水质模型	20
3.1.2 河流水环境容量计算模型	22
3.2 湖泊平面二维水质及水环境容量模型	24
3.2.1 平面二维水流-水质模型	24
3.2.2 湖泊水环境容量计算模型	26
第 4 章 生态环境需水量模型	28
4.1 河流生态环境需水量模型	28
4.1.1 河道内生态环境需水量	28

4.1.2	河道外生态环境需水量	31
4.2	湖泊生态环境需水量模型	31
4.2.1	生态需水量	32
4.2.2	环境需水量	33
第5章	水环境承载力系统动力学模型	34
5.1	系统动力学基本方程	34
5.2	系统动力学模型的建立及检验	35
5.2.1	系统边界确定	36
5.2.2	系统因果关系分析	36
5.2.3	系统流图设计	36
5.2.4	模型检验	36
5.3	系统动力学模型软件	36
5.3.1	Vensim 仿真软件	36
5.3.2	Envsim SD 模型软件	37
5.3.3	应用实例	38
5.3.4	小结	43

下篇 实践与应用

第6章	干旱区水环境承载力研究	47
6.1	新疆叶尔羌河流域水环境承载力研究	47
6.1.1	流域概况	47
6.1.2	指标体系的构建及权重确定	48
6.1.3	叶尔羌河流域生态环境需水量估算	49
6.1.4	叶尔羌河流域水环境承载力 SD 模型及其模拟	50
6.1.5	水环境承载力提升对策与建议	55
6.1.6	主要结论	56
6.2	新疆博斯腾湖流域水环境承载力研究	56
6.2.1	流域概况	56
6.2.2	指标体系的构建及权重确定	57
6.2.3	基于湖泊水流-水质数学模型的水环境容量研究	59
6.2.4	生态需水量和环境需水量研究	73
6.2.5	湖泊水环境承载力 SD 模型及其模拟	80
6.2.6	博湖水环境承载力调控研究	83
6.2.7	博湖水污染控制措施研究	85
6.2.8	主要结论	87
第7章	半干旱区水环境承载力研究	89
7.1	山西桑干河流域水环境承载力研究	89

7.1.1	流域概况	89
7.1.2	指标体系建立与权重确定	90
7.1.3	桑干河流域水环境容量计算	92
7.1.4	桑干河流域生态环境需水量研究	92
7.1.5	桑干河流域水环境承载力 SD 模型及模拟	94
7.1.6	主要结论	96
7.2	陕西省榆林市水环境承载力研究	97
7.2.1	研究区概况	97
7.2.2	指标体系选取与权重计算	98
7.2.3	榆林市河流水环境容量计算	99
7.2.4	榆林市生态环境需水量计算	101
7.2.5	榆林市水环境承载力 SD 模型及其模拟	103
7.2.6	主要结论	107
第 8 章	半湿润区水环境承载力研究	108
8.1	山西汾河流域水环境承载力研究	108
8.1.1	流域概况	108
8.1.2	指标体系的构建及权重确定	108
8.1.3	汾河流域水环境容量研究	110
8.1.4	汾河流域生态环境需水量计算	111
8.1.5	汾河流域水环境承载力 SD 模型及其模拟	112
8.1.6	主要结论	116
8.2	渭河陕西段水环境承载力研究	116
8.2.1	流域概况	116
8.2.2	水环境承载力指标体系及量化	117
8.2.3	渭河陕西段水环境容量研究	119
8.2.4	渭河陕西段生态基流量计算	123
8.2.5	渭河陕西段流域水环境承载力 SD 模型及其模拟	125
8.2.6	主要结论	132
参考文献		134

上篇 理论基础

第1章 绪 论

1.1 研究背景及意义

中国是人均水资源短缺的国家,加之水资源时空分布不均匀,水土资源的布局不相匹配,年际变化较大,尤其是干旱与半干旱地区,水资源开发利用与生态、环境的矛盾日益突出(彭静,2006)。矛盾主要表现为:①江河湖库水质日趋恶化;②河湖湿地逐步萎缩、生态功能衰退;③地下水超采与污染严重;④水土流失问题日益突出。这些问题严重地制约着中国国民经济和社会的可持续发展。如何保持水资源和水环境的可持续利用,成为中国目前一个重要问题。

在所有生态环境危机中,水资源危机以其对21世纪人类生产和生活的重大影响而位居首位。1998年中国长江、嫩江、松花江发生特大洪水,黄河断流,淮河、海河、辽河严重污染等表明一个重要的事实:现阶段对水资源管理和配置存在一定的误区,需从不同的角度重新审视水环境危机的本质,从而为解决淡水资源短缺寻求科学方案(杨志峰等,2003)。水利部副部长敬正书在《全国水利发展“十一五”规划编制工作会议上的讲话》中指出:水资源作为影响国家可持续发展全局的重要战略资源,如何实现水资源的可持续利用,更好地满足生活、生产和生态用水需求,使水资源承载力和水环境承载力与经济社会发展要求相适应,是水利发展“十一五”规划需要回答的重要问题。因此,要缓解 and 处理好水资源、生态环境、人口、经济发展之间的矛盾和关系,必须进行区域水环境承载力的研究。

水环境承载力(water environmental carrying capacity, WECC)是社会、经济发展,人类生活水平提高,科学技术进步条件下对环境价值的一种认识,其大小是决定社会经济可持续发展速度和规模的一个重要因素。它既是衡量水资源是否具有可持续性的一个重要指标,也是水资源与社会经济发展相互关联的一个关键因子,对协调区域经济-社会-环境可持续发展具有重要意义。因此,开展区域水环境承载力研究对水资源可持续利用和社会可持续发展都有着重要的理论和实践意义。

尽管国内外与水环境承载力相关的研究已经有了相当的积累,但是水环境承载力的科学定义尚未达成共识。由于研究涉及范围广、内容复杂,目前国内外也没有形成统一和成熟的水环境承载力研究方法。因此,进一步完善区域水环境承载力的理论体系,寻找科学、实用的定量化评价技术,探讨区域水环境承载状况及其可持续利用方式,对于协调区域经济社会发展具有重大的科学意义和实用价值,对于中国西北、华北等资源性缺水地区的可持续发展则更加必要和紧迫。

1.2 国内外研究进展

承载力 (carrying capacity) 一词原为物理力学中的一个物理量, 指物体在不产生任何破坏时的最大 (极限) 负荷, 最初被生态学引用, 指“在某一特定环境条件下 (主要指生存空间、营养物质、阳光等生态因子的配合), 某种生物个体存在数量的最高极限。”后来应用于土地、资源、环境、生态等各个领域, 产生了各种不同的承载力概念和相应的承载力理论 (姚治君等, 2002; Seidl and Tisdell, 1999)。

水环境承载力 (water environmental carrying capacity, WECC) 是环境承载力概念与水环境领域的自然结合。自 1990 年提出以来, 被广泛用于环境管理、环境规划和社会经济可持续发展研究。国外专门的研究较少, 一般仅在可持续发展文献中简单地涉及 (赵卫等, 2007)。如北美湖泊协会曾对湖泊承载力进行定义 (鞠美庭等, 2009); 美国 URS 公司 (2001) 以佛罗里达群岛流域为研究对象, 讨论了承载力的概念、研究方法和模型量化手段等; 美国环保局 (2002) 进行了四个镇区环境承载力研究, 具体计算了四个湖泊的环境承载力, 并提出了保护和改善湖泊水质的建议; Furuya (2003) 进行了日本北部水产业环境承载力的研究。此外, Falkenmark 和 Lundqvist (1998) 也有一些研究涉及水资源的承载限度; Joardar (1998) 对城市用水供应和卫生系统等基础设施的承载力进行评价, 以决定城市可持续发展的相对潜力; Rijiberman (2000) 在研究城市水资源评价和管理体系中将承载力作为衡量城市水资源安全保障的重要标准。

目前有关水环境承载力的研究主要集中在我国。20 世纪 90 年代初, 北京大学郭怀成等 (1994)、清华大学曾维华和程声通 (1996) 最先给出了水环境承载力的概念和量化方法, 同时国内开展了最初的城市水环境承载力研究 (崔凤军, 1995)。随后, 相关学者们就水环境承载力的定义内涵、指标体系、量化方法、建模方法等开展了大量工作。

1.2.1 概念与内涵

目前国内的还没有形成水环境承载力定义的统一提法。但综合已有的研究, 可以把对水环境承载力定义分为广义与狭义两类。

“狭义水环境承载力”等同于“水环境容量”, 或者是“水环境 (水体) 纳污能力”“水环境允许污染负荷量” (何少苓和彭静, 2003), 即在一定水域其水体能够被继续使用并仍保持良好生态系统时, 所能够容纳污水及污染物的最大能力。

“广义水环境承载力”系指某生产力水平下, 某一区域水环境对人类活动的最大支持能力。对于广义水环境承载力, 郭怀成 (1994)、崔凤军 (1995)、何少苓 (2003)、马文敏等 (2002) 认为, 水环境承载力可以理解为在某一时期, 某种状态或者条件下, 某地区的水环境所能承受的人类活动作用的阈值。此定义侧重于人类经济发展行为在规模、强度或速度上对水环境造成的压力; 廖文根等 (2002) 认为, 水环境承载力指水环境系统功能可持续正常发挥前提下接纳污染物的能力 (纳污能力) 和承受对其基本要素改变的能力 (缓冲弹性力), 即水环境承载力包括纳污能力和缓冲弹性力两个方面, 并

且以水环境系统功能的可持续正常发挥为前提。李清龙 (2004)、龙平沅 (2005)、杨维 (2008)、陈长安等 (2008) 认为: 水环境承载力指在某一特定的时期, 某种状态或条件下 (一定的时空条件下), 在一定的环境质量目标要求下, 某流域 (区域) 水环境在自我维持、自我调节能力和水环境功能 (生态环境系统良好健康发展) 可持续正常发挥前提下, 所支撑的人口、经济及社会可持续发展的最大规模。此定义着重于在社会经济与环境生态协调发展的背景下, 水环境所能承载的最大综合规模, 更多地关注社会时代发展对水环境造成的破坏及水环境适应社会发展的要求, 具有很强的概括性与时代性。

1.2.2 研究方法

由于对水环境承载力的定义认识不同, 研究者们选择的水环境承载力评价方法也千差万别。对狭义水环境承载力, 主要通过水环境容量计算和现阶段及未来的排污状况来进行承载力的评价和预测 (崔树彬, 2003; 汪恕诚, 2002)。而广义的水环境承载力研究涉及范围大、内容复杂, 目前国内外的研究方法有定性与定量之别, 归纳起来主要有四类: 指标体系综合评价法、多目标最优化和单目标最优化方法、系统动力学法以及模拟技术与优化技术混用的系统分析法。

1. 指标体系综合评价法

指标体系评价方法是目前应用较为广泛的一种量化模式, 主要有向量模法、模糊综合评价法和主成分分析法等。

向量模法是将水环境承载力表示为 n 个定量描述的指标 (n 维空间向量), 设有 m 个发展方案或 m 个时期 (地区) 的城市发展状态, 分别对应着 m 个水环境承载力, 对 m 个水环境承载力的 n 个指标进行归一化, 则归一化后的向量模表征水环境承载力的大小, 即相应方案、时期或地区的水环境承载力。该方法具有直观, 简单易行等优点, 但是忽略了水环境承载力概念的模糊性和向量所具有的方向性, 而且一般采用均权数法确定指标权重, 忽略了指标相对大小对承载力的贡献, 进而影响了评价结果的可靠性 (张文国和杨志峰, 2002)。贾振邦等 (1995) 就采用此方法对本溪市的水环境承载力进行了计算, 曾现进等 (2013) 运用向量模法和层次分析法相结合的方法对 2005~2020 年宜昌市水环境承载力进行了评价和分析。

模糊综合评价法是将水环境承载力的评价视为一个模糊综合评价过程, 其模型为: 设给定两个有限论域 $U = |u_1, u_2, \dots, u_n|$ 和 $V = |v_1, v_2, \dots, v_m|$, 其中 U 代表评价因素 (即评价指标) 集合, V 代表评语集合, 则模糊综合评价为下面的模糊变换: $B = A \cdot R$, 其中 A 为模糊权向量, 即各评价因素 (指标) 的相对重要程度, B 为 V 上的模糊子集, 表示评价对象对于特定评语的总隶属度, R 为由各评价因素 u_i 对评语 V 的隶属度 v_{ij} 构成的模糊关系矩阵, 其中的第 i 行第 j 列元素 r_{ij} 表示某个被评价对象从因素 u_i 来看对 v_j 等级模糊子集的隶属度。通过上面的合成运算, 可得出评价对象从整体上来看对于各评语等级的隶属度。再对上面的隶属度向量 B 的元素取大或取小, 就可确定评价对象的最终评语。该方法综合考虑了水环境承载力概念的模糊性和指标信息的随机不确定性, 提高了水环境承载力评价的准确性和可操作性 (曹利军, 1999),

但这种方法采用的取大或取小的运算法则会使部分有用的信息遗失。赵青松等(2006)曾在关于水环境承载力模糊评价的探讨中对此方法进行了较为细致的描述。于谨凯和杨志坤(2012)采用此法对渤海近海海域水环境承载力进行了评估。

主成分分析法在力保数据信息丢失最小的原则下,对高维变量系统进行最佳综合简化,以少数综合变量取代原始多维变量,同时客观地确定各变量的权重,避免了主观随意性。因此,主成分分析法是一种评价的好方法,而且在一定程度上克服了上述方法的缺陷;但在评价参数分级标准的制定和对主成分、控制点的选取方面存在一定的困难(傅湘和纪昌明,1999)。李如忠(2006)根据评价指标筛选原则,从经济、社会、资源、环境、技术与管理等角度设计了城市区域水环境承载力评价指标体系,构建了三层递阶层次结构模型,对评价指标进行无量纲化处理的基础上,提出了层次分析法与统计学法相结合的区域水环境承载力状态趋势评价模型。

指标体系评价法依赖于不同承载力的指标数值之间或者指标数值与标准值之间的对比,评价结果都是无量纲值,因此实际上是水环境与人类活动的协调程度并非严格概念意义上的水环境承载力。该方法忽略了水-生态-社会经济复合系统要素间的反馈机制,所描述的水环境承载力变化仅仅是指标变化的汇总,而且指标体系的建立缺乏严格的筛选框架。

2. 多目标和单目标最优化方法

多目标最优化方法是另一种常用的量化方法,它采用分解-协调的系统分析思路,将特定地区的水资源、人类社会经济系统划分成若干个子系统,并采用数学模型对其进行刻画,各系统模型之间通过多目标核心模型的协调关联变量相连接。若事先确定需要达到的优化目标(包括国内生产总值、人口、粮食产量和污染负荷量等方面)和约束条件,结合模型模拟和对决策变量在不同水平年上的预测结果,就可解出同时满足多个目标整体最优的发展方案,其所对应的人口或社会经济发展规模即为这一城市或地区的水环境承载力。目前多目标核心模型通常采用契比雪夫算法进行求解,在迭代收敛时采用融合了决策者对邻近点和矢量的 Z-W 算法。

多目标最优化方法被应用于研究黑河流域水资源承载力,蒋晓辉等(2001)建立多目标大系统分析协调模型研究陕西关中地区的水环境承载力,涂峰武(2006)分析了西洞庭湖泊水资源承载力的构成,探讨性地提出了湖泊水环境承载力概念模型,并给出了相应的量化指标。在此基础上,以西洞庭湖流域为研究对象,分析其水资源承载力,为湖泊流域水资源管理提供了科学依据。方国华等(2006)建立了多目标分析评价模型对江苏省张家港市水环境承载力进行了研究,并对规划年内该区域的水环境承载力进行了预测分析。张海斌(2011)通过建立基于多目标决策的流域水系统资源承载力优化模型,进而提出了浏阳河流域可持续发展管理对策。

单目标最优化方法实际上只是一种水污染控制系统规划方法。与其他方法相比,该方法简洁合理,所需计算量较小,但在此项研究中较少见。在水环境承载力分析与调控中,汪恕诚(2001)采用单目标最优化方法以最大的人口当量数为目标,以区域或流域内特殊用地(如森林用地、湿地等)的面积比和水环境质量等为约束条件,求解出最佳

的用地规划模式。

3. 系统动力学方法

系统动力学 (system dynamics, 简称 SD) 方法是一种定性与定量相结合, 系统、分析、综合与推理集成的方法, 并配有专门的 DYNAMO 软件, 给模型的仿真、政策模拟带来很大方便, 可以较好地把握系统的各种反馈关系, 适合于进行具有高阶次、非线性、多变量、多反馈、机理复杂和时变特征的承载力研究。系统动力学在对问题进行定性分析时, 强调系统、动态和反馈, 并使三者有机结合起来, 同时强调系统的结构决定系统的功能。这种方法的重要特点是通过一阶微分方程组来反映系统各个模块的变量之间的因果反馈关系。在实用中, 对不同的发展方案采用系统动力学模型进行模拟, 并对决策变量进行预测, 然后将这些决策变量视为水环境承载力的指标体系, 再运用综合评价方法进行比较, 得到最佳的发展方案及相应的承载能力。国内很多学者用系统动力学方法研究了城市 (冯海燕等, 2006; 王俭等, 2009)、湖泊 (王玉敏等, 2004; 潘红卫等, 2014)、河流 (赵卫等, 2008; 曾程等, 2013) 的水环境承载力, 但研究体系中对水质水生态的关注很少。郭怀成和唐剑武 (1995) 于 20 世纪 90 年代最早尝试将系统动力学用于城市水环境承载力研究, 建立了山东淄博水环境系统的预测和决策模型, 但当时的指标体系和系统研究思路还并不成熟、完整。

4. 模拟技术与优化技术混用的系统分析法

水环境承载力分析涉及自然条件和社会经济系统等方面, 是一个典型的复合性系统问题。系统的分析方法及其有关的量化模型, 可根据问题的性质选用并创新。其中被广泛应用于各个领域的人工神经网络法 (artificial neural network, 简称 ANN) 在水环境、水资源研究领域也有较多应用。人工神经网络是在人类对其大脑神经网络认识理解基础上, 人工构造的能够实现某种功能的神经网络。它是理论化的人工神经网络的数学模型, 是基于模仿大脑神经网络结构和功能而建立的一种信息处理系统, 根据所提供的数据, 通过学习和训练, 找出输入和输出之间的内在联系, 从而求出问题的解。尤其在信息不完备情况下, 在模式识别、方案决策、知识处理等方面具有很强的能力, 设计灵活, 可以较为逼真地模拟真实社会经济系统。它以其并行分布处理、自组织、自适应、自学习和一定容错性等独特的优良性质引起了广泛的关注。不过该方法在求解过程中需要大量的样本, 精度会受到影响, 且其应用范围比较有限。遗传算法是一种崭新的全局优化算法, 它借用了生物遗传学的观点, 通过自然选择、遗传、变异等作用机制, 实现各个个体适应性的提高。它采用简单的编码技术来表示各种复杂的结构, 并通过对一组编码表示进行简单的遗传操作和优胜劣汰的自然选择来指导学习和确定搜索的方向。杨丽花和佟连军 (2013) 在分析流域水环境承载力与经济发展非线性关系的基础之上, 建立了基于人工神经网络的区域水环境承载力评价模型, 并将其应用到吉林省松花江流域的研究中。该方法虽然具有快捷、简便、容错性强、具可扩展性、应用范围较广、全局优化性强等优点, 但其搜索速度较慢, 对初始种群的选择有依赖性。

1.3 研究内容及技术路线

1.3.1 研究内容

本研究针对中国北方资源性缺水地区普遍存在的水资源短缺、水环境恶化及生态脆弱等问题,面向生态文明制度建设这一国家重大需求,历经十余载,以水资源、水环境科学技术领域内“资源环境承载能力评估预测”这一关键科学问题为突破点,综合考虑资源性缺水地区水资源数量与质量之间的关系,兼顾理论研究与实际应用,构建了基于水动力学的水环境容量预测及生态需水量计算两方面内容的区域水环境承载力量化模式,形成了一套适用于中国北方资源性缺水地区的水环境承载能力评估预测研究体系,为资源性缺水地区生态保护红线的划定、区域资源环境承载能力监测预警机制的建立提供了理论依据与技术支持。主要研究内容包括如下几方面。

1. 基于水动力学的水环境容量模型研究

水环境容量作为反映区域水环境与社会经济活动密切程度的重要指标,是水环境承载力研究的重要组成部分。对于河流水环境容量计算,以一维水流水质数学模型为基础,最早提出了针对控制断面的段首控制法、段尾控制法和功能区段尾控制法来计算水环境容量,并分析比较了各方法的优缺点及相互联系,阐明了各方法的基本物理图形与适用条件;对于湖泊水环境容量,考虑风生湖流等水动力学特征对污染物迁移、扩散的影响,结合平面二维水流水质数学模型,将湖泊存贮容量和自净容量离散至水动力学模型中的各个网格点上分别进行计算,进而叠加得到湖泊整体水环境容量。

2. 生态需水量计算研究

生态需水量计算是水环境承载力研究的一个重要限制性因子。对于河流生态需水量,从河道外生态需水和河道内生态需水两方面进行考虑提出相应计算模式,其中河道外生态需水主要包括天然植被和人工植被需水,河道内生态需水主要包括生态基流量、输沙需水、蒸发渗漏需水量等;对于湖泊生态需水量,研究考虑资源性缺水地区的特点,采用水量平衡法、换水周期法、最小水位法和功能法等(王根绪,2005;崔瑛,2010)就蒸散需水、生物栖息地需水、防盐化需水及纳污稀释需水等进行计算。

3. 水环境承载力系统动力学模型研究

依据系统动力学原理,构建仿真模型,模拟水环境系统多变量之间相互作用、相互影响的动态行为,评估预测水环境系统与社会经济系统之间的相互关系。研究完善了用阈值定义的水环境承载力概念,明晰了水环境承载力的承载媒介、承载对象及影响因素,体现了水生态环境的动态特征;优化了资源性缺水地区水环境承载力评价指标体系,采用环境容量承载率作为水污染子系统的评价指标,建立了水环境、水生态与社会经济和管理活动之间的反馈联系;将基于水动力学的水环境容量与生态需水量计算纳入到了水环境承载力研究中,充分考虑维护生态环境健康的基本要求和不同环境条件下的

水体自净特点,科学地给出了水环境承载力的量化方法。

1.3.2 技术路线

本研究在深入探讨区域水环境承载力理论体系的基础之上,结合可靠、适宜的量化方法,构建区域水环境承载力评价模型,通过对干旱区(新疆叶尔羌河流域、博斯腾湖)、半干旱区(陕西榆林市山西桑干河流域)以及半湿润区(陕西渭河流域、山西汾河流域)实际区域的水环境承载力评价研究,建立并完善了科学、完整的区域水环境承载力评价思路,为资源性缺水地区的流域管理决策提供了切实可行的实施方案,对于协调水资源利用与经济活动之间的关系,实现区域生态环境与社会经济的科学、健康、可持续发展,具有重要而深远的意义。

研究取得了如下四方面的创新性成果:①完善了用阈值定义的水环境承载力概念;②优化了资源性缺水地区水环境承载力指标体系;③构建了基于水动力学数值模拟的水环境容量与生态需水量计算模型;④构建了水环境承载力的系统动力学仿真模型;⑤开发了具有自主知识产权的 Envsim SD 软件。

研究遵循如下方案及图 1.1 所示的技术路线开展工作。

1. 鉴于目前区域水环境承载力理论体系尚未形成,对区域水环境承载力进行理论研究,包括区域水环境承载力的定义、特性和影响因素等。

2. 在综合考虑资源性缺水区域实际情况的基础上,构建科学全面的区域水环境承载力评价指标体系,选择适宜的指标权重计算方法,为区域水环境承载力的定量化奠定基础。

3. 针对资源性缺水地区普遍存在的水资源短缺、水污染严重、水生态脆弱等问题,构建基于水动力学数学模型的水环境容量、生态环境需水量计算模式,并将其结果纳入水环境承载力研究体系。

4. 根据区域现实状况,具体分析影响区域水环境承载力诸多因素之间的因果关系,选取适当的方法构建数学模型对它们进行描述。

5. 在对模型有效性进行检验后,设计若干区域水环境承载力调控方案,通过模型的仿真模拟,对不同方案下的水环境承载力进行量化分析,研究水环境承载力与社会经济、水资源配置、水量供需平衡等之间的关系,最终确定出区域水环境与社会经济可持续发展的最佳方案。

6. 针对最佳方案进一步探讨提高区域水环境承载力的可行措施,提出区域水环境保护与恢复的定量化指标,以及宏观战略性对策与建议,为区域的可持续发展战略提供科学依据。